

## بررسی رفتار ساختمان‌های بتن آرمه تقویت شده به کمک بادبند فلزی \*

علی خیرالدین (۱)

چکیده یکی از روش‌های متداول در تقویت ساختمان‌های بتن آرمه موجود، استفاده از بادبند فلزی به عنوان یک سیستم سازه‌ای لرزه بر می‌باشد. استفاده از دو سیستم متفاوت بادبند فلزی و دیوار برشی در تقویت قاب خمشی بتن آرمه موجود، ترکیبی پیچیده و ناشناخته را ایجاد می‌کند. بررسی رفتار اینگونه سازه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله سعی می‌شود که تأثیر دیوار برشی و بادبندهای فلزی در تقویت ساختمان‌های بتن آرمه موجود و اندرکنش سه‌گانه آنها توسط آنالیز یک سازه بتن آرمه مورد بحث و بررسی قرار گیرد. نتایج نشان می‌دهند که اگر در یک سازه بتن آرمه موجود که دارای قاب خمشی و دیوار برشی می‌باشد و با بادبند فلزی تقویت شده است، تغییر مکان جانبی از حد مجاز تجاوز کند مساحت بادبند تا مقدار مشخصی می‌تواند مؤثر واقع شود و بعد از حد معین تأثیر چندانی بر روی رفتار سازه نخواهد داشت. با افزایش مساحت بادبندها جذب برش توسط قاب کاهش یافته و بعد از حد مشخصی بادبندها نقش خاصی را در جذب برش زلزله ندارند. رفتار بادبند و قاب در طبقات پایین تقریباً مشابه بوده و جذب برش زلزله توسط هر یک در طبقات پایین و میانی تقریباً برابر است. مقایسه دو سیستم قاب خمشی با بادبند و بدون بادبند نشان می‌دهد استفاده از بادبند فلزی، تغییر مکان جانبی سازه را حدود ۵۰ درصد کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی قاب بتن آرمه، بادبندی فلزی، دیوار برشی، تقویت لرزه‌ای، سازه ترکیبی.

### Behavior of Reinforced Concrete Buildings Strengthened Using Steel Bracing

A. Kheyroddin

**Abstract** One of the usual method for seismic retrofit of existing reinforced concrete buildings is steel bracing. The use of steel bracing and reinforced concrete shear wall for strengthening of existing reinforced concrete buildings usually leads to very complicated system and the study of this kind of structures is necessary. In this paper, the frame-shear wall and steel bracing interaction is investigated by the analysis of a three-story reinforced concrete building. The analytical results show that with an increase in the section area of steel bracing, the lateral displacement and earthquake shear absorption by the frame decreases. Increasing the section area of steel bracing improve the overall response of the structure, but it has a less significant effect on the results after a certain level. The behavior of steel bracing and frame and the amount of shear absorption by both of them is approximately the same in the lower part of structure. Application of steel bracing decreases the lateral displacement by about 50 percent.

**Key Words** Reinforced Concrete Frame, Steel Bracing, Shear Wall, Seismic Retrofit, Hybrid Structure.

\* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۰/۱۱/۶ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۱۳۸۲/۷/۲۰ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه سمنان

## مقدمه

میانقاب‌های بتنی و با مصالح بنایی را بر روی قاب‌های بتن مسلح آزمایش کردند. هدف آنها تعیین مقاومت و شکل‌پذیری قاب‌های بتن آرمه تقویت شده بود [1].

در سال ۱۹۹۰ بادیوکس (Badoux) و جیرسا (Jirsa) مقاله‌ای را تحت عنوان "قاب‌های بتن آرمه با بادبندهای فلزی جهت تقویت لرزه‌ای" به چاپ رساندند. در این مقاله عملکرد سیستم بادبندی فولادی برای افزایش مقاومت لرزه‌ای قاب‌های بتن آرمه به روش آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که بادبندهای قطری برای تأمین مقاومت و سختی ساختمانهای موجود در برابر بارهای جانبی بسیار خوب عمل می‌کنند [2].

در سال ۱۹۹۴ ناطق الهی مقاله‌ای را تحت عنوان "تقویت لرزه‌ای آپارتمان هشت طبقه بتن آرمه به وسیله بادبندهای فلزی" منتشر کرد. در این مقاله راجع به روش‌های تقویت و ملاحظات به کارگرفته شده به منظور تقویت ساختمان برای بارهای جانبی و قائم اطلاعاتی ارائه شده است [3].

پینچیرا (Pincheira) و جیرسا (Jirsa) در سال ۱۹۹۵ مقاله دیگری تحت عنوان "پاسخ لرزه‌ای قاب‌های بتن آرمه تقویت شده به وسیله بادبندهای فلزی" منتشر کردند. در این مقاله محققان مجدداً به بررسی نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی و استاتیکی غیرخطی سه گروه از قاب‌های بتن مسلح غیرشکل‌پذیر که به روش‌های مختلف بادبندی، تقویت یا بازسازی شده‌اند، پرداخته‌اند [4].

در سال ۱۹۹۵ ماهری (Maheri) و صاحبی (Sahebi) مقاله‌ای را تحت عنوان "بررسی آزمایشگاهی قاب‌های بتن آرمه با بادبندهای فلزی" ارائه کرده‌اند. برای انجام این بررسی چهار نمونه قاب با مقیاس  $\frac{1}{4}$  ساخته شده و تحت بارگذاری برشی رفت و برگشت درون صفحه‌ای، مورد آزمایش واقع شده‌اند. نتایج این آزمایشات نشان داده است که شکست نهایی قاب، همراه با انهدام بادبند کششی و به دنبال انهدام بادبند

بررسی زلزله‌های گذشته کشور نشان می‌دهد که بسیاری از ساختمانهای بتن آرمه ایران در برابر زلزله، مقاوم نیستند. آسیب دیدن ساختمانها در برابر زلزله و حوادث غیرمترقبه، تغییر کاربری، تغییر ضوابط آئین‌نامه‌ها و افزایش طبقات فوقانی و توسعه بنا، از جمله دلایلی می‌باشند که مقاوم‌سازی سازه را الزامی می‌سازند. بسته به نوع سازه و شرایط معماری، اقتصاد طرح و در دسترس بودن مصالح و تکنولوژی ساخت، روش‌های گوناگونی برای تقویت سازه‌های بتن آرمه به کار می‌روند که متداولترین و معروفترین آنها عبارتند از: زره‌پوش و ورق‌پوش کردن، افزودن دیوار برشی و بادبند فلزی، سیستم پس‌تیدگی و استفاده از میانقاب به دلیل محدودیت معماری. یکی از روش‌های متداول برای تقویت ساختمانهای بتن آرمه موجود، استفاده از سیستم بادبند فلزی می‌باشد. به علت کمبود اطلاعات و عدم شناخت درست رفتار این سازه‌ها که در آنها گاهی قاب بتن آرمه خمشی به همراه دیوار برشی و بادبند فلزی بکار رفته است، استفاده از آنها با بصیرت کافی صورت نمی‌گیرد.

به منظور بررسی رفتار ترکیبی دیوار برشی و بادبند فلزی و اثرات مساحت بادبندها بر روی رفتار سازه بتن آرمه و درصد برش جذب شده و تغییر مکان جانبی سازه، در این مقاله یک سازه بتن آرمه ده طبقه در چهار مرحله تحت تأثیر نیروهای قائم و زلزله تحلیل و طراحی شده است. در مرحله اول قاب خمشی تنها، در مرحله دوم قاب و دیوار برشی، در مرحله سوم قاب به همراه دیوار برشی و بادبند فلزی و در مرحله چهارم قاب بتن آرمه به همراه بادبند فلزی مورد مطالعه قرار گرفته است.

## نگرشی بر تحقیقات انجام شده

سوگانو (Sugano) و فوجی مورا (Fujimura) در سال ۱۹۸۰ تأثیر استفاده از بادبندهای X و K شکل و

افزایش تعداد طبقات، تأثیر بادبند کاهش یافته و وجود بادبند در طبقات فوقانی برش منفی ایجاد می‌نماید. همچنین نتایج نشان می‌دهد نسبت‌های  $0 < e/L < 0.25$  از لحاظ کاهش نیروی زلزله و تغییر مکان جانبی حد مناسبی به شمار می‌رود ( $e$  طول تیر رابط و  $L$  طول دهانه قاب می‌باشد).

### مشخصات سازه‌های آنالیز شده

برای مطالعه پارامتری، یک ساختمان ده طبقه بتن آرمه که دارای ۵ دهانه ۴ متری در جهت  $X$  و ۴ دهانه ۳ متری در جهت  $Y$  می‌باشد انتخاب گردید. کاربری ساختمان مسکونی و بار مرده کف  $750 \text{ kg/m}^2$ ، بار معادل پارتیشن  $150 \text{ kg/m}^2$  و بار زنده طبقات و بام  $200 \text{ kg/m}^2$  منظور شده است. گذاشتن بادبندها و دیوار برشی در جهت  $X$  بر روی محوره‌های ۱ و ۵ از لحاظ معماری ایرادی ندارد. محل دیوارهای برشی و بادبندها نیز در شکل (۱) دیده می‌شوند. مقاومت فشاری بتن (نمونه استوانه‌ای)  $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$  در نظر گرفته شده است. تنش تسلیم فولادهای اصلی  $f_y = 3000 \text{ kg/cm}^2$  و خاموتها  $f_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$  منظور شده است. ارتفاع طبقات ساختمان ۳ متر می‌باشد. سیستم باربر جانبی در جهت  $X$  (شرقی - غربی)، سیستم مختلط قاب خمشی فضایی، بادبند و دیوار برشی و در جهت  $Y$  (شمالی - جنوبی) تنها قاب خمشی فضایی می‌باشد. برای بارگذاری از آیین‌نامه‌های ۵۱۹ و ۲۸۰۰ ایران و برای طراحی اعضای بتن آرمه، آیین‌نامه ACI و برای اعضای فولادی از آیین‌نامه AISC استفاده می‌شود.

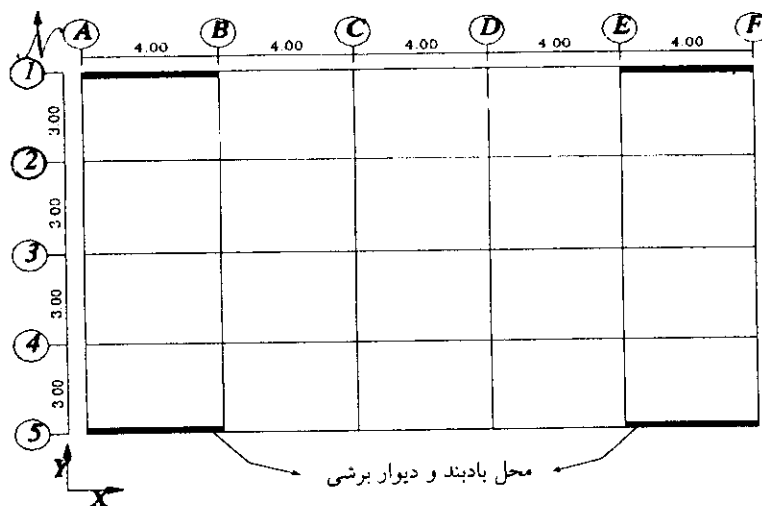
برای محاسبه بار زلزله، از روش شبه استاتیکی آیین‌نامه ۲۸۰۰ استفاده شده است. ابتدا کل برش پایه محاسبه و سپس به نسبت وزن در طبقات پخش شده است. با توجه به مدل سه‌بعدی سازه، نیروی زلزله در مرکز جرم هر طبقه و در جهت  $X$  اثر داده شده است. سقف‌ها صلب فرض شده‌اند. نیروی زلزله تنها در

فشاری صورت گرفته است و بادبند کششی بر رفتار قاب حاکم است. از دیگر نتایج این آزمایش، افزایش قابل توجه مقاومت قابی است که به صورت ضربدری بادبندی شده و مقاومت آن تا سه برابر افزایش یافته است. همچنین استفاده از تنها یک بادبند (فشاری یا کششی) ظرفیت قاب را بیش از صد درصد افزایش می‌دهد [5].

در سال ۱۳۷۶ حاجی غفاری مقاله‌ای را تحت عنوان "اندرکنش قاب و بادبند فولادی در سازه‌های بتن مسلح برای تحمل نیروهای جانبی" ارائه نمود. در این مقاله او تأثیر بادبندهای فلزی  $X$  و  $K$  شکل را برای تقویت قاب خمشی بتن آرمه بدون دیوار برشی مورد بررسی قرار داد. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که در صورت استفاده از بادبند فولادی در قاب بتن مسلح، تنش مجاز طراحی برای بادبند فولادی  $0.1f_y$  استفاده شود. در این صورت بادبندها می‌توانند ۷۵ درصد نیروی جانبی جذب کنند [6].

در سال ۱۳۷۶ همتی و تسنیمی یک پایان‌نامه کارشناسی ارشد با عنوان "بررسی آزمایشگاهی اتصالات تقویت شده در ساختمانهای بتن مسلح در مقابل نیروهای جانبی" ارائه کردند. در این پایان‌نامه مقاومت برشی و انحنای محل اتصال و همچنین سازگاری عناصر تقویت‌کننده با قاب‌های بتن مسلحی که فقط برای بارهای ثقلی طراحی شده‌اند و به وسیله بادبندهای فلزی برای افزایش مقاومت لرزه‌ای آنها تقویت شده‌اند، در یک بررسی آزمایشگاهی ارائه شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد که مقاومت برشی هسته اتصال در نمونه‌های تقویت شده افزایش یافته و انحنای آنها کاهش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد [7].

در سال ۱۳۸۰ خیرالدین و شمخالی مقدم رفتار بادبندهای واگرای فلزی (EBF) را در تقویت قاب‌های بتن آرمه موجود مورد بررسی قرار دادند [8]. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که بادبندهای واگرا برای ساختمان‌های کوتاه در همه طبقات مفید است ولی با



شکل ۱. پلان ساختمان ده طبقه بتن آرمه

دوم، قاب به همراه دیوارهای برشی بدون بادبند تحت اثر بار قائم و صد درصد نیروی زلزله قرار می‌گیرد (شکل ۳- سازه FW1). هدف این دو مرحله از آنالیز این است که ابعاد دیوارها و تیرها و ستونها به گونه‌ای تعیین شوند که قاب‌ها بتوانند ۲۵ درصد نیروی زلزله و دیوارها ۷۵ درصد نیروی زلزله را تحمل نمایند تا طرح بهینه و اقتصادی باشد. در مرحله سوم، قاب به همراه دیوار برشی و بادبند ضربه‌پذیری فلزی تحت اثر بار قائم و ۱۰۰ درصد نیروی زلزله آنالیز شده و اثر متقابل دیوار برشی و بادبند فلزی بر روی قاب خمشی بتن آرمه بررسی شده است (شکل ۴- سازه FWB1).

در مرحله چهارم آنالیز، قاب به همراه بادبند ضربه‌پذیری فلزی بدون دیوار برشی تحت اثر بار قائم و ۱۰۰ درصد نیروی زلزله واقع شده است و مساحت مورد نیاز بادبند فلزی برای تقویت ساختمان بتن آرمه موجود تعیین گردیده است (شکل ۵- سازه FB1).

در جدول شماره (۱) مشخصات مراحل مختلف آنالیز، نوع سیستم مقاوم و ضخامت دیوارهای برشی و مساحت بادبندها و درصد نیروی زلزله اعمال شده

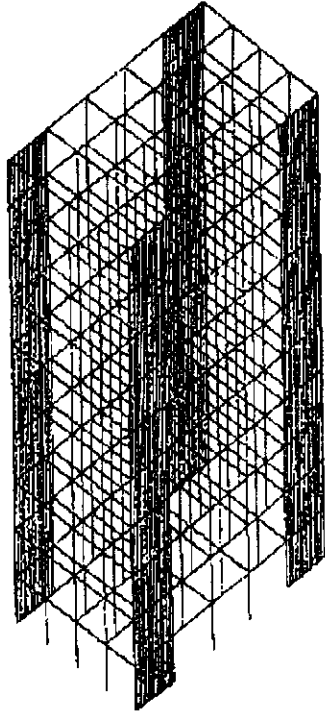
جهت X و طبق ترکیب دوم  $0.75(1.87E)$  به سازه اعمال شده است.

### آنالیز سازه

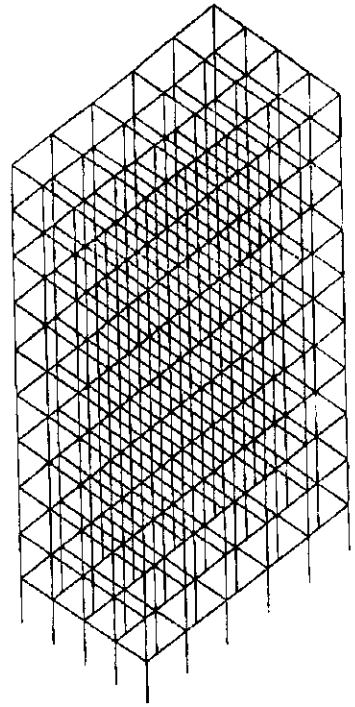
با توجه به در نظر گرفتن اثرات P.Δ و مدل نمودن صحیح دیوار برشی، از برنامه ETABS در تحلیل و طراحی و بررسی نتایج استفاده شده است.

بعد از آنالیز سازه توسط برنامه ETABS، برای طراحی از برنامه Conker و برای دیوار برشی از برنامه Waller استفاده شده است. مقاطع نهایی اعضا و فولادهای مورد نیاز با چند بار سعی و خطا محاسبه شده‌اند.

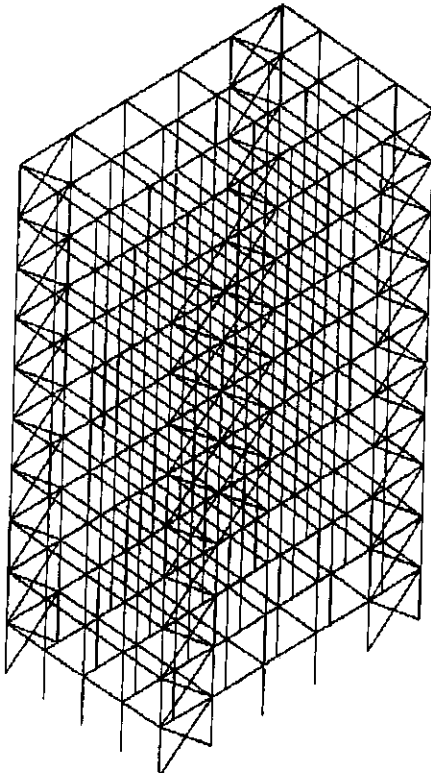
آنالیز در چهار مرحله صورت می‌گیرد. در مرحله اول آنالیز، قاب سه بعدی تنها تحت اثر بار قائم و ۲۵ درصد نیروی زلزله قرار می‌گیرد. در این قسمت سعی شده است که اعضای قاب بتوانند افزون بر بار قائم، ۲۵ درصد نیروی زلزله را که طبق آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران توصیه می‌شود، تحمل نمایند (سازه F25). همچنین، در این مرحله قاب بتن آرمه تحت بار قائم و ۱۰۰ درصد نیروی زلزله واقع می‌شود (F100) (شکل ۲). در مرحله



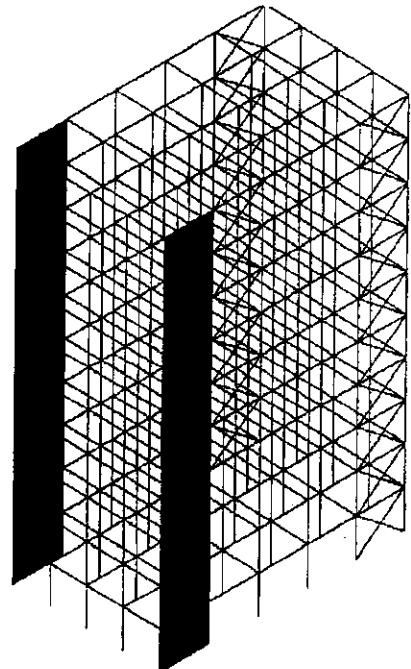
شکل ۳ مرحله دوم آنالیز - قاب و دیوارهای برشی (FW1)



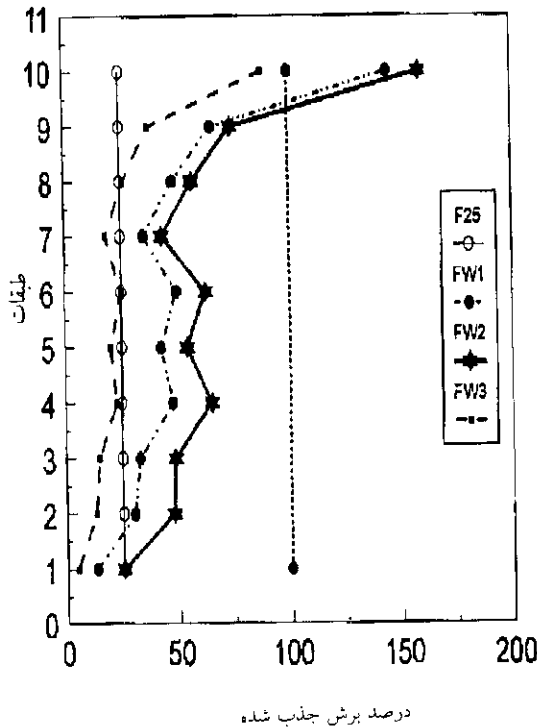
شکل ۲ مرحله اول آنالیز - قاب بتن آرمه تنها (F100)



شکل ۵ مرحله سوم آنالیز - قاب و بادبندهای فلزی (FB1)



شکل ۴ مرحله سوم آنالیز - قاب دیوارهای برشی و بادبندهای



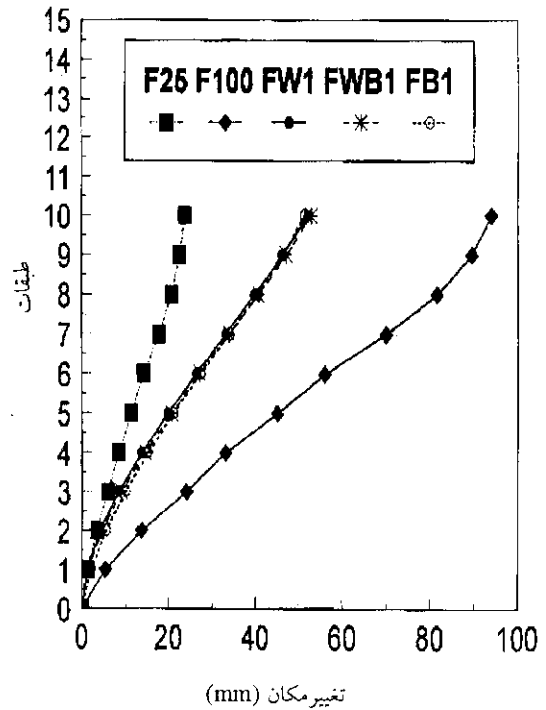
شکل ۷ اثر ضخامت دیوار برشی بر روی جذب برش زلزله توسط قاب

تیرها در این مرحله به عنوان ملاک در مراحل بعدی بکار رفته است. در این مرحله همچنین قاب به تنهایی تحت بار قائم و کل بار زلزله فرار می‌گیرد (سازه F100). همانطور که در شکل (۶) دیده می‌شود، قاب بتن آرمه بصورت برشی تغییر شکل داده و تغییر مکان جانبی در طبقه دهم برابر ۹۴ میلی‌متر می‌باشد که حدود چهار برابر با سازه F25 می‌باشد.

### مرحله دوم

در این مرحله قاب به همراه چهار عدد دیوار برشی در حالت‌های مختلف تحت کل بار قائم و ۱۰۰ درصد نیروی زلزله آنالیز شده و موارد زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل (۷) اثر ضخامت دیوار برشی بر روی درصد برش جذب شده توسط قاب را نشان می‌دهد. منظور از درصد



شکل ۶ تغییر مکان جانبی سازه در طبقات مختلف برای چهار مرحله آنالیز

مشاهده می‌شود. در نامگذاری سازه‌ها، F قاب بتن آرمه، W دیوار برشی و B بادی فلزی می‌باشد.

### مرحله اول

بعد از آنالیز سازه‌ها، منحنی‌های تغییر مکان جانبی سازه در طبقات مختلف برای چهار مرحله آنالیز در شکل (۶) نشان داده است. در مرحله اول قاب سه‌بعدی تحت اثر بار قائم و ۲۵ درصد نیروی زلزله قرار گرفته است.

همانطور که از شکل شماره (۶) دیده می‌شود، در سازه F25 قاب در مد برشی تغییر مکان داده است. بیشترین تغییر مکان در طبقه دهم برابر ۲۳/۶ میلی‌متر می‌باشد. مقادیر تغییر مکان و برش جذب شده توسط قاب برای این منظور محاسبه می‌شوند تا کمیت بادی و بادیوار برشی که باعث می‌شود قاب فقط ۲۵ درصد نیروی زلزله را تحمل کند، بدست آید. ابعاد ستونها و

جدول ۱ مشخصات مراحل مختلف آنالیز

مرحله آنالیز	سیستم مقاوم در برابر زلزله	نام سازه (نام فایل)	دیوار برشی		بادبندها		% نیروی اعمال شده
			طبقات	ضخامت cm	طبقات	مساحت cm <sup>2</sup>	
۱	قاب تنها	F25	۱-۱۰	۰	۱-۱۰	۰	%۲۵
		F100	۱-۱۰	۰	۱-۱۰	۰	%۱۰۰
۲	قاب و چهار دیوار برشی	FW1	۱و۲	۲۰	۱-۱۰	۰	%۱۰۰
			۳و۴	۱۷/۵			
			۵و۶	۱۵			
			۷و۸	۱۲/۵			
			۹و۱۰	۱۰			
		FW2	۱-۱۰	۷	۱-۱۰	۰	%۱۰۰
		FW3	۱و۲	۸۰	۱-۱۰	۰	%۱۰۰
			۳و۴	۷۰			
			۵و۶	۶۰			
			۷و۸	۵۰			
			۹و۱۰	۴۰			
		FW4	۱و۲	۲۰	۱-۱۰	۰	%۱۰۰
			۳و۴	۱۷/۵			
			۵و۶	۱۵			
			۷	۱۲/۵			
			۸و۹و۱۰	۱۰			
۳	قاب و دو دیوار برشی و دو بادبند فلزی	FWB1	۱و۲و۳و۴	۲۰	۱و۲	۴۸	%۱۰۰
			۳و۴	۱۷/۵	۳و۴	۴۰/۸	
			۵و۶	۱۵	۵و۶	۳۴	
			۷و۸	۱۲/۵	۷و۸	۲۷	
			۹و۱۰	۱۰	۹و۱۰	۲۲	
		FWB2	۱و۲	۲۰	۱و۲	۰	%۱۰۰
			۳و۴	۱۷/۵	۳و۴	۰	
			۵و۶	۱۵	۵و۶	۰	
			۷و۸	۱۲/۵	۷و۸	۰	
			۹و۱۰	۱۰	۹و۱۰	۰	

ادامه جدول ۱

		FWB3	۱و۲	۲۰	۱و۲	۱۴۴	%۱۰۰
			۳و۴	۱۷/۵	۳و۴	۱۲۲/۴	
			۵و۶	۱۵	۵و۶	۱۰۲	
			۷و۸	۱۲/۵	۷و۸	۸۱	
			۹و۱۰	۱۰	۹و۱۰	۶۶	
		FWB4	۱و۲	۲۰	۱و۲	۴۸۰	%۱۰۰
			۳و۴	۱۷/۵	۳و۴	۴۰۸	
			۵و۶	۱۵	۵و۶	۳۴۰	
			۷و۸	۱۲/۵	۷و۸	۲۷۰	
			۹و۱۰	۱۰	۹و۱۰	۲۲۰	
۴	قاب بتن آرمه به همراه چهار بادبند فلزی	FB1			۱و۲	۴۸	%۱۰۰
					۳و۴	۴۰/۸	
					۵و۶	۳۴	
					۷و۸	۲۷	
					۹و۱۰	۲۲	
		FB2			۱و۲	۱۲۰	
					۳و۴	۱۰۲/۲	
					۵و۶	۸۵	
					۷و۸	۶۷/۵	
					۹و۱۰	۵۵	
		FB3			۱و۲	۲۴۰	
					۳و۴	۲۰۵	
					۵و۶	۱۷۰	
					۷و۸	۱۳۵	
					۹و۱۰	۱۱۰	
		FB4			۱و۲	۴۸۰۰۰	
					۳و۴	۴۱۰۰۰	
					۵و۶	۳۴۰۰۰	
					۷و۸	۲۷۰۰۰	
					۹و۱۰	۲۲۰۰۰	



کم شود و در طبقه دهم به ۴۰ سانتیمتر برسد که این ضخامت‌ها اجرایی نیستند (سازه FW3). در این حالت اگرچه جذب نیروی زلزله توسط قاب در طبقات حدوداً ۲۵ درصد است ولی در طبقه اول جذب نیرو توسط قاب حدود ۵ درصد است (شکل ۷).

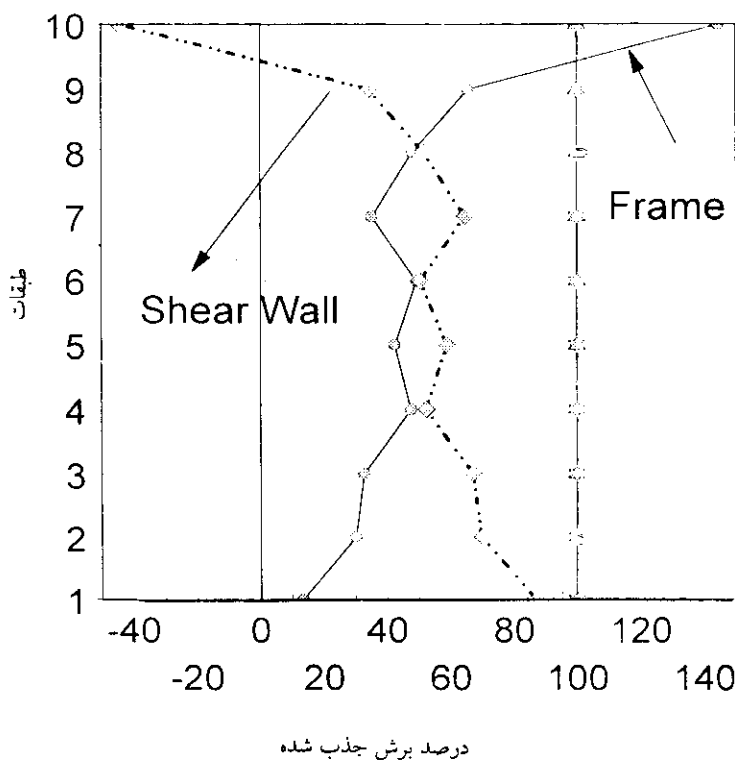
اگر ضخامت دیوارها به صورت اجرایی و منطقی در نظر گرفته شوند (FW1)، یعنی در پایین ضخامت دیوار ۲۰ سانتیمتر و هر دو طبقه ۲/۵ سانتیمتر کم شود و در طبقه دهم به ۱۰ سانتیمتر برسد، همانطور که از شکل (۷) مشاهده می‌شود سازه رفتاری متعادل از خود بروز می‌دهد. از آنجا که این حالت ملاک کار قرار گرفته است توضیحات بیشتری در این مورد ارائه می‌گردد.

شکل (۸) اندرکنش قاب و دیوار برشی را در

برش جذب شده، نسبت مقدار برشی که توسط ستون‌های قاب یا بادبند در هر طبقه تحمل می‌شود به کل برش وارده در هر طبقه می‌باشد.

ابتدا سعی شده که جذب نیروی زلزله توسط قاب‌ها به اندازه ۲۵ درصد باشد. اگر ضخامت دیوارها بسیار کم منظور شود (در همه طبقات ۷ سانتیمتر - سازه FW2)، اگر چه قاب در طبقه پایین ۲۵ درصد نیروی زلزله را می‌برد ولی در بقیه طبقات جذب نیرو توسط قاب زیاد شده و تغییر مکان سازه نیز بسیار زیاد خواهد بود.

برای آنکه تغییر مکان سازه مرحله دوم با تغییر مکان قاب به تنهایی تحت اثر ۲۵ درصد نیروی زلزله (F25) یکی شود، لازم است که ضخامت دیوارها در پائین ۸۰ سانتیمتر و به ترتیب هر دو طبقه ۱۰ سانتیمتر



شکل ۸ اندرکنش قاب - دیوار برشی (سازه FW1)

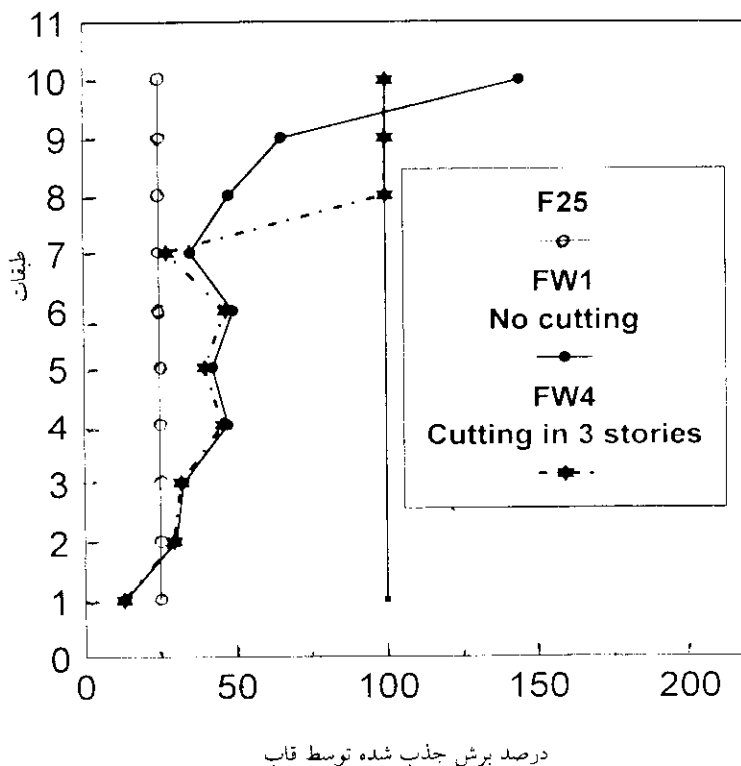
مختلف نهایتاً بهترین حالت بدست آمد (FW4). شکل (۹) نشان می‌دهد که اگر دیوار برشی در سه طبقه بالا قطع شود ( $\frac{h}{H} = 0.7$ ) ارتفاع طبقات قطع نشده دیوار و H ارتفاع کل ساختمان می‌باشد) در هیچ طبقه‌ای درصد جذب نیروی زلزله توسط دیوار برشی منفی نخواهد بود و کل زلزله در سه طبقه فوقانی توسط قاب تحمل می‌شود. این روش اقتصادی می‌باشد و از لحاظ تغییر مکان نیز فرق چندانی مشاهده نمی‌شود.

### مرحله سوم

در این مرحله قاب به همراه دیوار برشی و بادبند ضربدری فلزی تحت اثر بار قائم و صد درصد نیروی زلزله قرار گرفته است و تأثیر بادبند و سطح آن بر روی رفتار یک ساختمان بتن آرمه که توسط دو عدد دیوار برشی در هر طبقه تقویت شده است، بررسی می‌گردد.

سازه (FW1) نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل مشاهده می‌شود قاب در پائین حدود ۱۳/۳ درصد و دیوارهای برشی حدود ۸۶/۷ درصد از نیروی زلزله را جذب می‌کنند.

جذب نیرو توسط قاب در طبقات دوم تا نهم بین ۳۰ تا ۶۵ درصد متغیر می‌باشد. از آنجا که به علت اندرکنش قاب و دیوار، دیوار رفتاری خمشی دارد، در بالا قاب به دیوار کمک می‌کند و همانطور که دیده می‌شود جذب نیرو توسط دیوار در بالا ۴۵- درصد می‌باشد یعنی نه تنها دیوار نیروی زلزله را جذب نمی‌کند بلکه تولید نیروی در جهت نیروی زلزله می‌نماید. به همین دلیل قاب در طبقه دهم حدود ۱۴۵ درصد نیروی زلزله را جذب می‌نماید، که چندان مناسب نیست. برای رفع این نقیصه تصمیم گرفته شد که در طبقات فوقانی، دیوار قطع گردد. با تحلیل‌های



شکل ۹ اثر قطع دیوار برشی در طبقات بالا بر روی برش جذب شده توسط قاب

مساحت بادبندها ۳ برابر مقادیر یاد شده در بالا انتخاب گردد درصد جذب قاب در دو سازه FW1 و FWB3 یکی می‌شود، هرچند سازه FWB1 نیز منحنی تقریباً مشابهی را با سازه FW1 ارائه می‌دهد. بنابراین نهایتاً سازه FWB1 در این مرحله ملاک کار قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج بدست آمده، یک مساحت بهینه برای بادبندها جهت طراحی پیشنهاد می‌شود.

در صورتی که بادبندها از سیستم حذف شوند (مثل سازه FW2 قاب و دو دیوار برشی) جذب برش زلزله توسط قاب بسیار افزایش می‌یابد بطوری که در طبقه آخر جذب برش توسط قاب به ۲۰۰٪ می‌رسد؛ به عبارت دیگر دیوارهای برشی اثر منفی داشته و به قاب تکیه می‌دهند. با افزایش مساحت بادبندها جذب برش توسط قاب مخصوصاً در طبقه بالا کاهش می‌یابد. به این ترتیب می‌توان ادعا نمود که تأثیر منفی دیوار برشی از ۲۰۰٪ به ۱۵۰٪ کاهش یافته است.

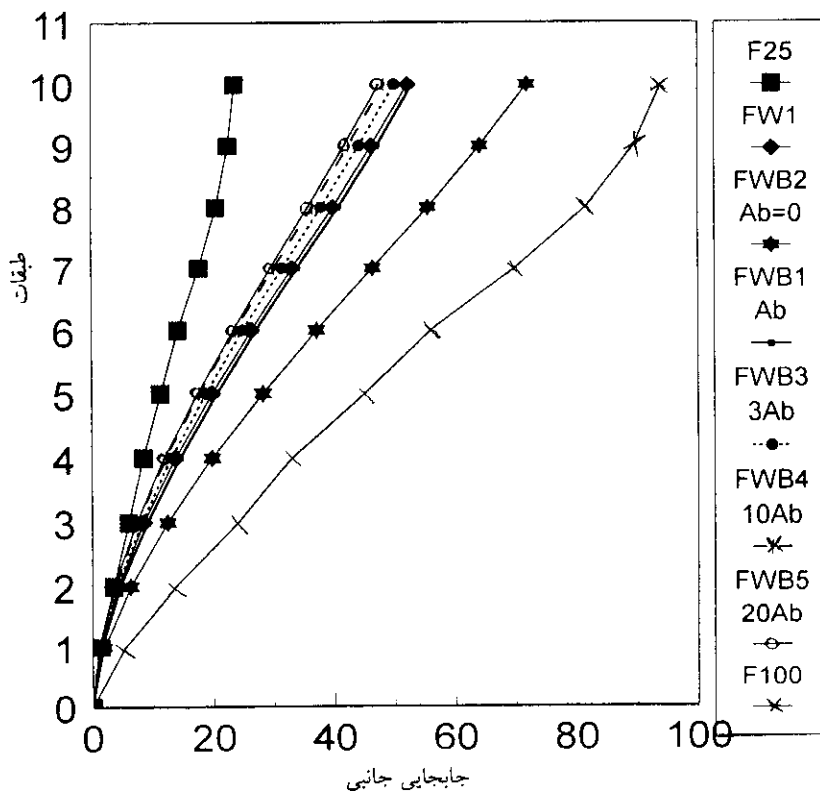
شکل (۱۲) تغییرات درصد جذب برش زلزله توسط قاب رانسبت به مساحت بادبندها مشخص می‌کند. همانطور که دیده می‌شود با افزایش مساحت بادبندها جذب برش توسط قاب کاهش می‌یابد و از حد مشخصی (حدود ۵۰ سانتیمتر مربع)، بادبندها نقش خاصی را در جذب برش زلزله ندارند. به عبارت دیگر نمی‌توان هر نوع ساختمان بتن آرمه را تنها با بادبند فلزی تقویت نمود. برای تعیین دقیق این حد، باید ساختمان‌های مختلف با دهانه و ارتفاع متفاوت آنالیز و بررسی شوند.

شکل (۱۳) اندرکنش قاب، دیوار برشی و بادبند فلزی را در سازه FWB1 نشان می‌دهد. از این شکل مشاهده می‌شود که رفتار بادبند و قاب در پائین تقریباً مشابه یکدیگرند. قاب در بالا دچار برش بسیار زیاد می‌شود در حالی که بادبند در بالا و پایین رفتار مشابهی دارد. باوجود بادبند جذب زلزله توسط دیوار کم شده، ولی در طبقه آخر بادبند نیرو جذب کرده و از آن طرف برش منفی دیوار زیاد می‌شود. در سازه FW1 جذب

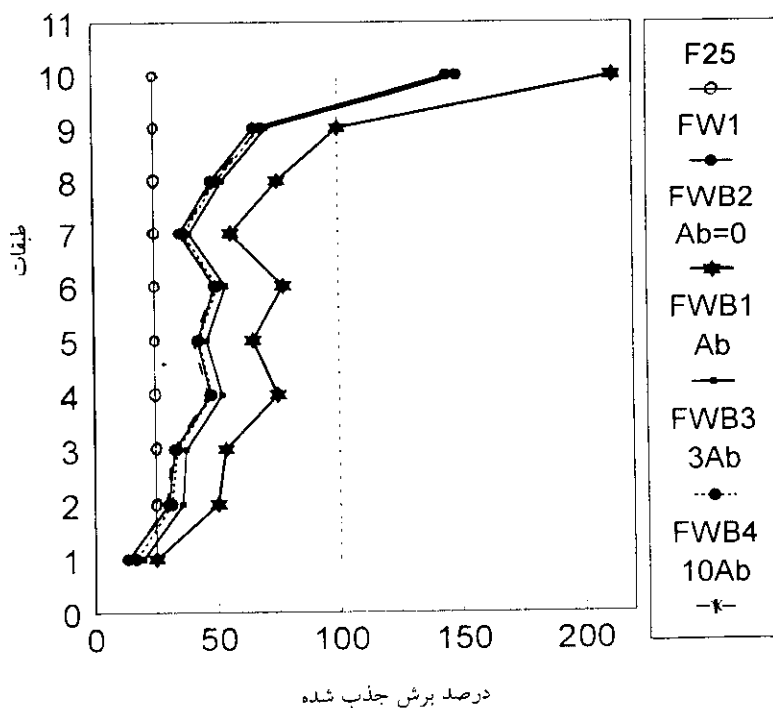
در این قسمت به جای دو عدد از دیوار برشی‌های مرحله دوم، دو عدد بادبند ضربدری در نظر گرفته شده است (شکل ۴). در این مرحله سعی شده است که با تغییر دادن سطح بادبندها یک بار تغییر مکان جانبی سازه با تغییر مکان بدست آمده از مرحله دوم و اول برابر گردد و در حالت دیگر جذب نیروی برشی توسط قاب در مرحله سوم و دوم یکسان شود.

نتایج آنالیزهای متعدد نشان می‌دهد که اگر برای تمامی مشخصات، سازه FW1 استفاده شود و تنها برای بادبندهای ضربدری، در طبقه اول و دوم از دو عدد ناودانی ۱۶ با مساحت ۴۸ سانتیمتر مربع و در طبقات سوم و چهارم از دو عدد ناودانی ۱۴ با مساحت ۴۱ سانتیمتر مربع و در طبقات پنجم و شش از دو عدد ناودانی ۱۲ با مساحت ۳۴ سانتیمتر مربع و در طبقات هفتم و هشتم از دو عدد ناودانی ۱۰ با مساحت ۲۷ سانتیمتر مربع و در طبقات نهم و دهم از دو عدد ناودانی ۸ با مساحت ۲۲ سانتیمتر مربع استفاده شود، تغییر مکان مراحل سوم و دوم آنالیز یکسان می‌شود (سازه‌های FW1 و FWB1). شکل (۷) این مطلب را به طور واضح نشان می‌دهد. همانطور که از شکل (۱۰) دیده می‌شود حتی اگر مساحت بادبندها ۱۰ برابر شوند (سازه FWB4) تغییر مکان سازه در این مرحله نمی‌تواند با حالت مرحله اول (۲۵ درصد نیروی زلزله و قاب تنها، سازه F25) برابر شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اگر در یک سازه بتن آرمه موجود تغییر مکان جانبی از حد مجاز تجاوز کند تا مقدار مشخصی مساحت بادبندها می‌تواند مؤثر واقع شود و بعد از حد معین، تأثیر چندانی بر روی رفتار سازه نخواهد داشت. همچنین دیده می‌شود که اگر بادبندی مورد استفاده قرار نگیرد (سازه FWB2) تغییر مکان جانبی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

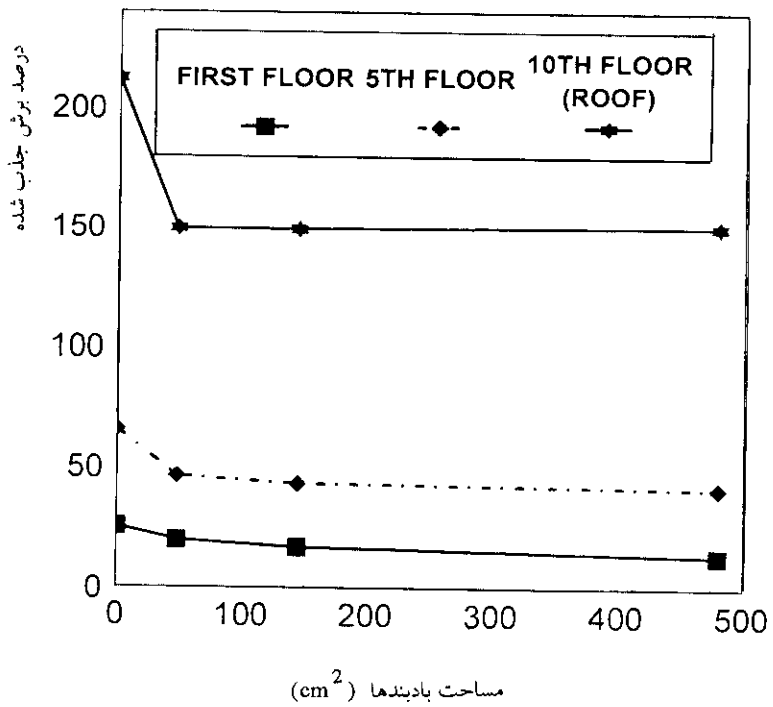
شکل (۱۱) نحوه جذب نیروی زلزله توسط قاب را برای مراحل اول و دوم و سوم آنالیز، و تأثیر مساحت بادبندها را بر روی رفتار سازه نشان می‌دهد. اگر



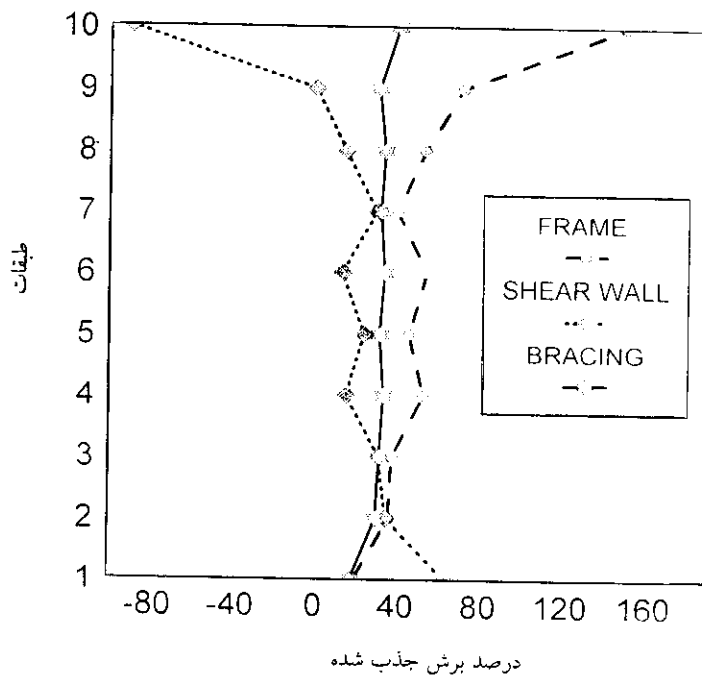
شکل ۱۰ اثر مساحت بادبندها بر روی تغییر مکان جانبی (مرحله سوم)



شکل ۱۱ اثر مساحت بادبندها بر روی جذب برش زلزله



شکل ۱۲ تأثیر مساحت بادبندها بر روی درصد جذب برش زلزله توسط قاب (مرحله سوم آنالیز)



شکل ۱۳ اندرکنش قاب، دیوار برشی و بادبند فلزی (سازه FWB1)

به علت رفتار متفاوت قاب و بادبند، جذب نیرو توسط بادبند در بالا منفی می‌باشد یعنی نه تنها بادبند، نیروی زلزله را جذب نمی‌کند بلکه تولید نیروی اضافی می‌نماید که قاب باید آن را تحمل کند، به عبارت دیگر بادبند فقط در طبقات پایین مفید می‌باشد. برای رفع این مشکل، پیشنهاد می‌شود که بادبندها در طبقات فوقانی ادامه نیابند. رفتار بادبند و قاب در طبقات پایین و میانی تقریباً مشابه بوده و جذب برش زلزله توسط هر یک تقریباً برابر است.

### تأثیر مساحت بادبندها

بعد از بررسی تأثیر بادبند در قاب بتن آرمه، در این قسمت مساحت بادبندها را افزایش داده و تغییر مکان جانبی سازه و مقدار برش جذب شده توسط قاب و بادبند در مرحله چهارم بررسی شده‌اند. همانگونه که قبلاً مطرح شد در سازه FB1 جذب نیروی زلزله توسط قاب در طبقه اول حدود 40 درصد است، برای آنکه جذب نیروی برشی زلزله توسط قاب در طبقه اول به 25 درصد برسد مساحت بادبندها نسبت به سازه FB1، 2/5 برابر افزایش یافته است (سازه FB2). اگر مساحت بادبندها 5 برابر نسبت به سازه FB1 افزایش یابد جذب نیروی زلزله توسط قاب در طبقه اول به 16 درصد می‌رسد (FB3). در سازه FB4 به طور اغراق آمیزی مساحت بادبندها نسبت به سازه FB1، 1000 برابر شده است. در شکل (14) تغییر مکان جانبی سازه‌های FB1، FB2 و FB3 در طبقات مختلف مشاهده می‌شود. با افزایش مساحت بادبندها، کاهش تغییر مکان جانبی چندان چشمگیر نمی‌باشد. به عنوان مثال، مقایسه دو سازه FB1 و FB4 نشان می‌دهد که تغییر مکان جانبی در طبقه دهم از 51/4 میلی‌متر در سازه FB1 به 43 میلی‌متر در سازه FB4 کاهش یافته است (حدود 16 درصد). همچنین می‌توان نتیجه گرفت که اگر در یک سازه بتن آرمه موجود تغییر مکان جانبی از حد مجاز تجاوز کند

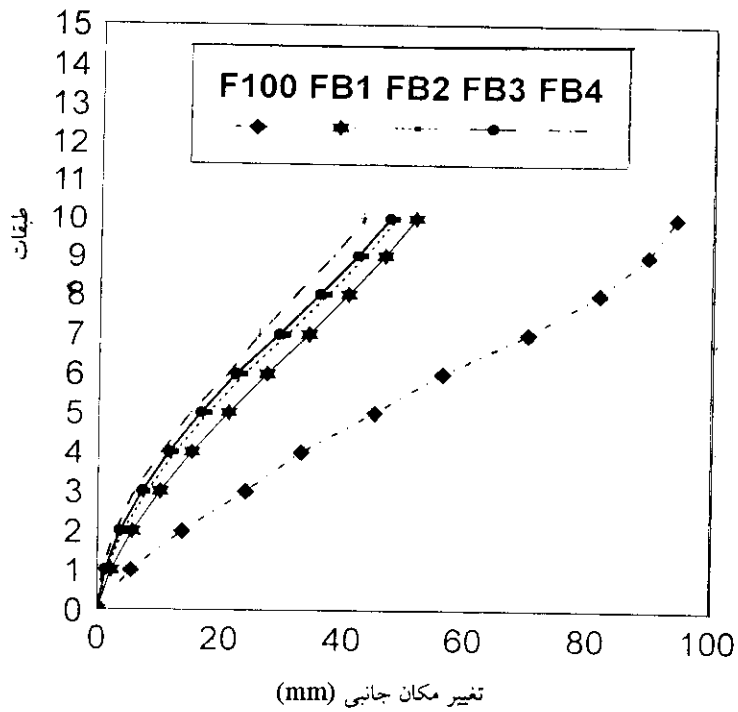
برش در بالا توسط دیوار 44٪- بوده در حالی که در سازه FWB1 برابر 84٪- می‌باشد. این شکل همچنین نشان می‌دهد که قطع دیوار در طبقات بالا تأثیری بر روی جذب نیروی زلزله توسط قاب ندارد ولی برش منفی دیوار را زیاد می‌کند.

### مرحله چهارم

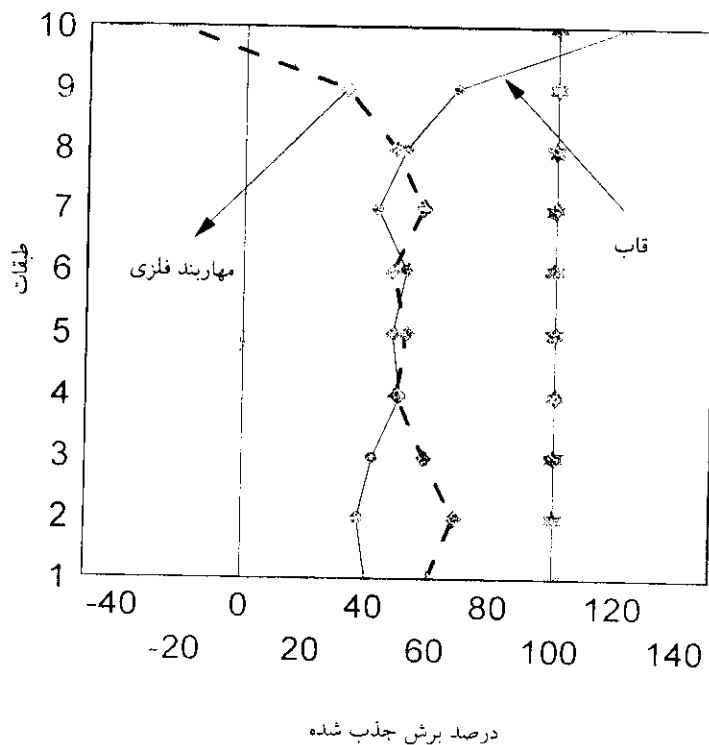
در این مرحله قاب به همراه بادبند ضربداری فلزی بدون دیوار برشی تحت اثر بار قائم و صددرصد نیروی زلزله آنالیز شده است. در مدل سازه کل دیوارهای برشی حذف شده و به جای آنها بادبند ضربداری فلزی مورد استفاده قرار گرفته است. به این ترتیب، تأثیر بادبندها بر روی رفتار یک قاب فضایی خمشی بتن آرمه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای آنکه تغییر مکانهای جانبی سازه در مرحله دوم (قاب با دیوار برشی و بدون بادبند) و مرحله چهارم (قاب با بادبند و بدون دیوار برشی) یکی شود، از بادبندهای استفاده شده در سازه FB1 استفاده شده است (سازه FB1). در این حالت جذب نیروی زلزله توسط قاب در طبقه اول حدود 40 درصد است. تغییر مکان سازه FB1 در طبقه بام 51/4 میلی‌متر است که حدود نصف سازه قاب بتن آرمه بدون بادبند می‌باشد (شکل 14)؛ به عبارت دیگر، مقایسه دو سیستم قاب خمشی با بادبند و بدون بادبند نشان می‌دهد استفاده از بادبند فلزی، تغییر مکان جانبی سازه را حدود 50 درصد کاهش داده و سختی سازه را به اندازه دو برابر افزایش می‌دهد. تغییر شکل قاب بتن آرمه که با بادبند تقویت شده است بصورت ترکیبی از مد خمشی و برشی می‌باشد. شکل (15) درصد برش جذب شده توسط بادبند و قاب بتن آرمه را در طبقات مختلف برای سازه FB1 نشان می‌دهد.

با توجه به رفتار متفاوت قاب بتن آرمه و بادبند فلزی، اثر متقابل بین قاب و بادبند بوجود می‌آید. در طبقه پایین جذب برش توسط قاب حدود 40 درصد و توسط بادبند حدود 60 درصد است. در طبقات فوقانی



شکل ۱۴ اثر مساحت بادبندها بر روی تغییر مکان جانبی (مرحله چهارم)



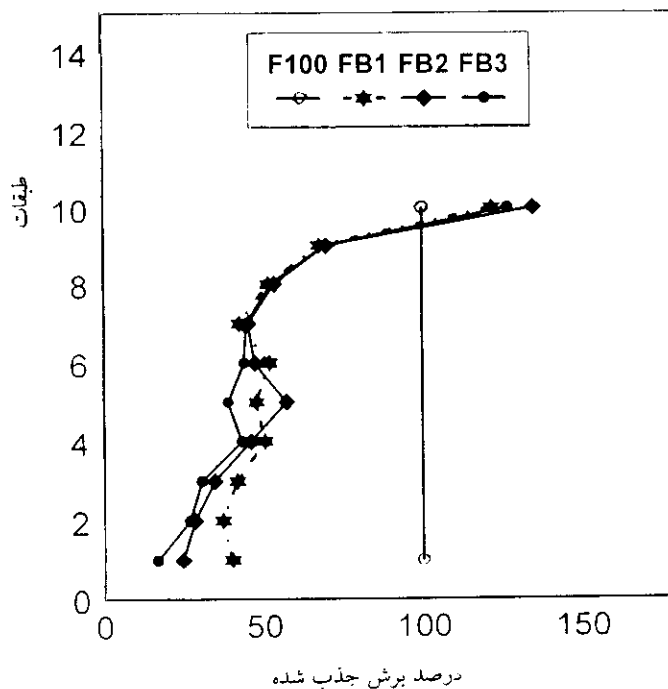
شکل ۱۵ درصد برش جذب شده توسط باد بند و قاب بتن آرمه (سازه FB1)

فونداسیون ضروری می‌باشد که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نبوده و از لحاظ اجرایی مشکلات خاص خود را به همراه دارد.

در شکل (۱۷) اثر مساحت بادبندها بر روی درصد برش جذب شده توسط قاب در طبقه اول و بام مشاهده می‌شود. در طبقه اول (منحنی خط چین)، با افزایش سطح بادبندها، مقدار برشی که توسط قاب تحمل می‌شود کاهش می‌یابد یعنی بادبند در طبقات پایین به قاب کمک می‌کند و از حد خاصی به بعد، وجود بادبند تأثیر زیادی روی تحمل برش زلزله ندارد. در طبقه بام (منحنی توپر)، رفتار بادبند به صورت معکوس می‌باشد، به عبارت دیگر با افزایش مساحت بادبندها درصد برش جذب شده توسط قاب افزایش یافته و از صد درصد بیشتر می‌شود. براساس این نتیجه‌گیری وجود بادبند در طبقات بالا نه تنها مفید نمی‌باشد بلکه بهتر است قطع گردد.

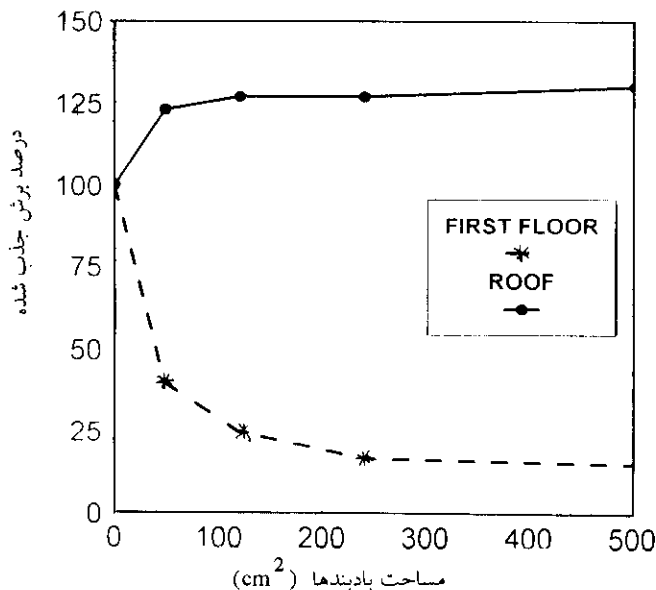
مقدار مشخصی مساحت بادبند می‌تواند مؤثر واقع شود و بعد از حد معین، تأثیر چندانی بر روی رفتار سازه نخواهد داشت. همچنین دیده می‌شود که اگر بادبندی مورد استفاده قرار نگیرد (سازه F100) تغییر مکان جانبی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد.

شکل (۱۶) نحوه جذب نیروی زلزله توسط قاب را برای مقادیر مختلف مساحت بادبندها نشان می‌دهد. با توجه به مساحت‌های بدست آمده در سازه‌های FB2 و FB3 و FB4 که از لحاظ اجرایی معقول به نظر نمی‌رسند، می‌توان اینگونه نتیجه‌گیری کرد که سازه‌های بتن آرمه موجود بهتر است توسط دیوار برشی یا ترکیبی از دیوار برشی و بادبند تقویت شوند. استفاده از بادبندهای فلزی به تنهایی در سازه‌های بتن آرمه موجود باعث ایجاد نیروهای زیادی در اعضای قاب (تیر و ستون) می‌شوند. در این صورت تقویت این اعضا و



شکل ۱۶ اثر مساحت بادبندها بر روی درصد برش جذب شده توسط قاب





شکل ۱۷ اثر مساحت بادبندها بر روی درصد برش جذب شده توسط قاب

### نتیجه گیری

استفاده از بادبند برای تقویت ساختمان‌های بتن آرمه موجود که دارای دیوار برشی می‌باشند نشان می‌دهد که رفتار بادبند و قاب در طبقات پایین تقریباً مشابه یکدیگرند و در طبقات بالا نیروی برشی زلزله اکثراً توسط قاب تحمل می‌شود. از نتایج مشاهده می‌شود که بادبند در ارتفاع به صورت تقریباً ثابتی برش زلزله را جذب می‌کند در حالی که دیوار برشی در پایین خوب کار کرده و در طبقات بالا اثر منفی دارد. بادبندها تا حد مشخصی در تقویت سازه کمک می‌کنند و تعیین مقدار بهینه برای مساحت بادبندها به تحقیقات بیشتری نیاز داشته و باید ساختمان‌های مختلف بادخانه و ارتفاع متفاوت آنالیز و بررسی شوند. نتایج نشان می‌دهند در سازه FB۱ طبقه پایین جذب برش توسط قاب حدود ۴۰ درصد و توسط بادبند حدود ۶۰ درصد است. در طبقات فوقانی به علت رفتار متفاوت قاب و بادبند، جذب نیرو توسط بادبند در بالا منفی می‌باشد یعنی نه تنها بادبند، نیروی زلزله را جذب نمی‌کند بلکه تولید نیروی اضافی می‌نماید که قاب باید آنرا تحمل کند.

برای رفع این مشکل، پیشنهاد می‌شود که بادبندها در طبقات فوقانی ادامه نیابند. با افزایش مساحت بادبندها جذب برش توسط قاب در طبقات پایین کاهش یافته ولی در طبقات بالا، جذب برش توسط قاب افزایش می‌یابد. رفتار بادبند و قاب در طبقات پایین تقریباً مشابه بوده و جذب برش زلزله توسط هر یک در طبقات پایین و میانی تقریباً برابر است. مقایسه دو سیستم قاب خمشی با بادبند و بدون بادبند نشان می‌دهد استفاده از بادبند فلزی، تغییر مکان جانبی سازه را حدود ۵۰ درصد کاهش می‌دهد.

### تشکر و قدردانی

این مقاله، نتایج یک طرح تحقیقاتی است که در دانشکده مهندسی دانشگاه سمنان و با حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه سمنان انجام شده است، بدین وسیله از کلیه مسئولان ذیربط تشکر و قدردانی می‌گردد. همچنین از راهنمایی‌های ارزنده مشاور طرح، جناب آقای دکتر مرتضی زاهدی صمیمانه تقدیر و تشکر می‌گردد.

## مراجع

1. Sugano, S. and Fujimura, M., "Seismic strengthening of existing reinforced concrete building", *Proceedings of Seventh World Conference on Earthquake Engineering, Part 1, Vol. 4, Turkey*, pp. 44-456, (1980).
2. Badoux, M., and J. O. Jirsa, "Steel bracing of RC frames for seismic retrofiting", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 116(1), pp.55-74, (1990)
3. Nateghi-A. "Seismic strengthening of eight-story RC apartment building using steel brace", *Engineering Structure*; Vol. 17, No. 6, pp. 455-461, (1995).
4. Pincheira, and O. Jirsa; "Seismic response of RC retrofitted with steel braces or walls", *Journal of structural Engineering, ASCE*: pp. 1225-1235, August (1995).
5. Maheri, M. R., and Sahebi, A. "Experimental investigations of steel braced reinforced concrete frames", *Proceeding of the Second International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Vol. 1, Tehran, Islamic Republic of Iran: May 15-17*, pp. 775-784, (1995).
۶. حاجی غفاری، حسین، "اندرکنش قاب و بادبند فولادی در سازه‌های بتن مسلح برای تحمل نیروهای جانبی"، پنجمین کنفرانس مهندسی عمران- دانشگاه صنعتی شریف، تهران، صفحه ۲۲۸ تا ۲۳۸، (۱۳۷۶).
۷. همتی، سیفا...، "بررسی آزمایشگاهی اتصالات تقویت شده در ساختمانهای بتن مسلح در مقابل نیروهای جانبی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۷۶).